

УДК 622.235.5.001.57

Камянский Виктор Николаевич
инженер, Горный институт КИЦ РАН,
184209, г. Апатиты, Мурманская обл.,
ул. Ферсмана 24
e-mail: kamyanski@goi.kolasc.net.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗРЫВА СКВАЖИННЫХ ЗАРЯДОВ В СРЕДЕ ANSYS

Аннотация:

Применение средств численного моделирования является перспективным методом решения задач горного дела. Использование расчетного комплекса Ansys Autodyn применительно к задачам взрыва позволяет исследовать физику процесса разрушения на более высоком качественном уровне. Основное внимание в работе уделено решению задач взрыва в трехмерной, двухмерной и осесимметричной постановках. Путем сравнения расчетных гидродинамических параметров детонационной волны проверена степень адекватности уравнения состояния продуктов детонации Джонса-Уилкинсона-Ли (JWL) аналитическому решению. Проведено качественное сравнение различных моделей прочности разрушения при моделировании взрывного разрушения.

Ключевые слова: численное моделирование, разрушение горных пород, взрыв, взрывчатое вещество, детонация, модели прочности и разрушения

DOI: 10.18454/2313-1586.2017.01.119

Kamyansky Victor N.
engineer,
The Mining institute KSC RAS,
184209, Apatite, 24 Fersman st.
E-mail: kamyanski@goi.kolasc.net.ru,

BOREHOLE BLASTING SIMULATION USING ANSYS SOFTWARE

Abstract:

The means of numerical simulation employment is a promising tool for solution many problems in mining art. The Ansys Autodyn software applications allows investigating the physics of break-down process on a highly qualitative level. The main attention in the paper is drawn to explosive problem solution in 3D, 2D and axi-symmetric statements. By comparing the calculating hydrodynamic parameters of the detonation wave the degree of JWL equation of state adequacy to analytical solution is checked. A qualitative comparison of different strength and failure models is performed.

Key words: Numerical simulation, rock failure, blast, explosive, detonation, strength and failure models.

Введение

Современное состояние горной промышленности, в силу постоянно изменяющихся горно-геологических условий, требует проведения работ, направленных на улучшение существующей технологии добычи полезных ископаемых. Буровзрывные работы, являющиеся неотъемлемой частью технологической цепочки производства, также требуют постоянного совершенствования. Применение современных средств математического моделирования взрывного разрушения горных пород позволяет оценить характер трещинообразования и оптимизировать параметры буровзрывных работ.

Для моделирования процесса взрывного разрушения массива горных пород скважинными зарядами использовалась система инженерного анализа ANSYS с модулем AUTODYN. Специализированный модуль ANSYS AUTODYN – это аналитический инструмент для решения задач в явной постановке, служащий для моделирования сложной нелинейной динамики твердых тел, жидкостей, газов и их взаимодействия [1].

Разработка модели взрывания скважинных зарядов ведется в ANSYS AUTODYN по ряду причин:

1. Компания ANSYS является одним из мировых лидеров в области компьютерного моделирования, в основе которого положен метод конечных элементов, а ее пользовательские продукты находят свое применение на многих передовых предприятиях промышленности.
2. AUTODYN является относительно простым в освоении, а его пользовательский интерфейс дает возможность в сжатые сроки редактировать элементы модели и получать наглядные результаты.

3. Среди аналогов модулю AUTODYN практически нет равных по расчетной возможности, которая наиболее полно при всех прочих равных условиях отражает физику исследуемого явления, что многократно подтверждено накопленным мировым опытом в использовании данного продукта.

Для осуществления процесса моделирования в трехмерной постановке в ANSYS AUTODYN рассматривались четыре основных типа решателей: Лагранжев, Эйлеров, произвольный Лагранжево-Эйлеровый, а также бессеточный решатель SPH (гидродинамика сглаженных частиц).

Одной из главных уникальных особенностей данного расчетного модуля является хорошо разработанный алгоритм связывания различных решателей. Алгоритм связывания Эйлеровой расчетной сетки с Лагранжевой делает возможным решение задач взаимодействия течения жидкостей и газов с твердыми телами [2].

Моделирование физических процессов в среде ANSYS AUTODYN реализуется посредством численного решения системы дифференциальных уравнений в частных производных, что представляет собой совокупность законов сохранения энергии, импульса и массы, а также дополнительных уравнений и моделей материалов.

Численными методами решения данных уравнений в модуле AUTODYN являются метод конечных элементов, метод конечных объемов, метод конечных разностей. Последний метод используется для решения задач в двухмерной постановке.

Путем задания модели горной породы определяются взаимосвязи и корреляционные зависимости между основными физико-механическими параметрами моделируемого объекта, а также происходит их увязка с основными термодинамическими величинами. Моделирование разрушения среды осуществляется на основе решения уравнений состояния, модели прочности (критерия прочности) и модели разрушения, а также математического алгоритма искусственной эрозии конечных элементов.

Уравнение состояния представляет собой зависимость между давлением, плотностью и удельной энергией материала.

Модель прочности (критерий прочности) характеризует сопротивление материала сдвигу/растяжению. Данное уравнение описывает поведение и предельные состояния материалов при приложении внешних сил. Предельные состояния выражаются через упругие и пластические режимы деформирования, критерием перехода между режимами является, главным образом, предел текучести.

Модель разрушения – уравнения, связывающие параметры среды в момент разрушения с параметрами, обеспечивающими их прочность, что определяет момент начала трещинообразования [3].

Алгоритм искусственной эрозии элементов – с помощью данного алгоритма решается проблема чрезмерного нарушения Лагранжевой сетки: при больших нарушениях сетки, элемент, деформированный сверх определенного предела, удаляется из расчетной области, а действующие на него силы перераспределяются на соседние элементы. Данный алгоритм используется, главным образом, для моделирования процесса хрупкого разрушения [4].

Основной целью проводимого исследования является разработка расчетной модели взрывания скважинных зарядов в массиве горных пород в трехмерной постановке, посредством которой возможно определение зоны нарушения массива при взрыве, а также характера распределения полей наиболее значимых физических величин.

Для достижения целей исследования ставятся следующие задачи:

1. Проверка степени соответствия гидродинамических параметров детонационной волны и продуктов детонации, рассчитанных аналитическим путем, с данными, полученными в ходе вычислительного эксперимента.

2. Определение и выбор наиболее подходящего критерия прочности, описывающего поведение апатит-нефелиновых руд при динамическом нагружении.

Отработка параметров модели

Программный продукт ANSYS AUTODYN позволяет моделировать процесс разрушения с помощью различных моделей среды: RHT-модель; модель Друкера-Прагера; модель Купера-Саймонда; модель билинейного упрочнения и модель фон Мизеса. Для выбора адекватной модели среды для рассматриваемых условий (апатит-нефелиновые руды) проведены серии вычислительных экспериментов в двухмерной постановке для всех указанных моделей и проведено сравнение с модельными экспериментами на образцах горных пород.

Первоначально в целях отработки параметров уравнений состояния, критериев прочности и разрушения, а также сокращения расчетного времени промоделирован взрыв заряда ВВ в двухмерной осесимметричной и двумерной постановках.

Целью моделирования взрыва в двухмерной осесимметричной постановке является проверка степени соответствия гидродинамических параметров детонационной волны рассчитанной аналитическим путем, с данными, полученными в ходе вычислительного эксперимента (рис. 1).

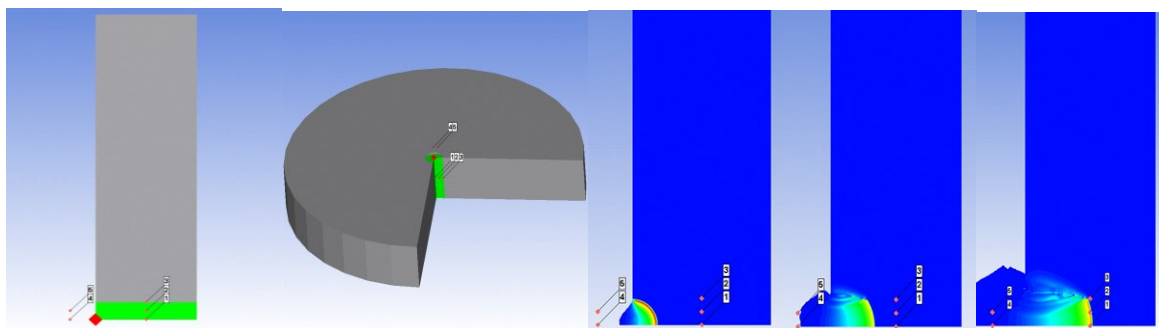


Рис. 1 – Моделирование детонационной волны в двухмерной осесимметричной постановке

Поскольку задача моделирования прохождения детонационного фронта по взрывчатому веществу ставится в двухмерной осесимметричной постановке, то геометрия модели представлена в форме прямоугольника с размерами 66×20 мм. Область, занятая взрывчатым веществом, расположена в нижней части прямоугольника, и имеет размеры 3,75 × 20 мм (на рисунке отображена зеленым цветом). Общее количество элементов в расчетной области - 649920.

В качестве ВВ выбран ТЭН плотностью 880 кг/м³. Для определения состояния продуктов детонации принято уравнение Джонса-Уилкинсона-Ли (JWL) со стандартными для данного ВВ коэффициентами. По результатам проведенных вычислительных экспериментов получены зависимости изменения плотности ВВ на фронте волны и давления на фронте детонационной волны, а также определена массовая скорость частиц за фронтом волны и скорость продуктов детонации (рис. 2, 3).

Полученные результаты моделирования сравнивались с аналитическими решениями.

Основные гидродинамические параметры детонационной волны и продуктов детонации рассчитывались по формулам:

$$\rho = \frac{4}{3} \rho_0, \text{ кг/м}^3, \quad (1)$$

где ρ – плотность ВВ на фронте детонационной волны, кг/м³; ρ_0 – начальная плотность ВВ, кг/м³;

$$V_M = \frac{D(\rho - \rho_0)}{\rho}, \text{ м/с}, \quad (2)$$

где V_M – массовая скорость за фронтом детонационной волны, м/с; D – скорость детонации, м/с;

$$P = 2P_{cj} \left(1 - \frac{c^2}{D^2}\right) + P_0, \text{ ГПа}, \quad (3)$$

где P – давление на фронте детонационной волны, ГПа; P_{cj} – давление в точке Жуге, ГПа; c – скорость звука в ВВ, м/с; $c = D - V_M$; P_0 – атмосферное давление 101,3 КПа.

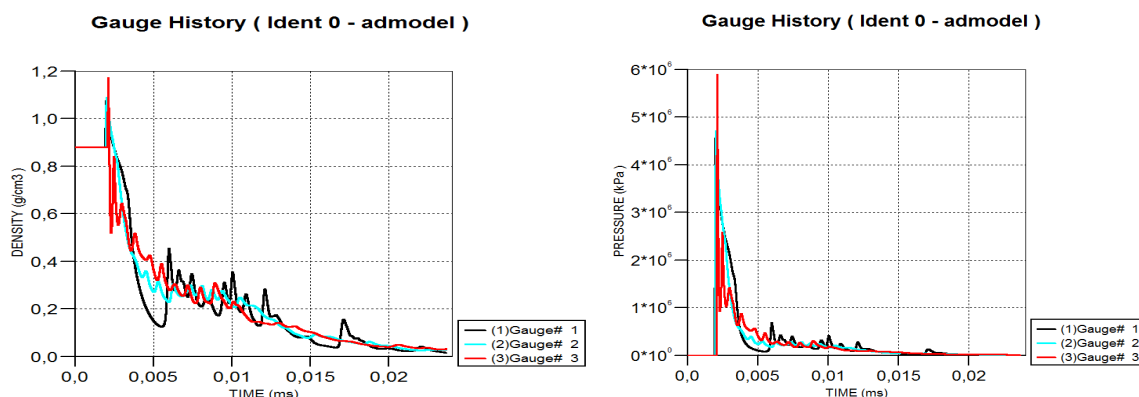


Рис. 2 – Графики зависимостей плотности и давления от времени на фронте детонационной волны на расстояниях (1) – 10; (2) – 10,17 и (3) – 10,68 мм от точки инициирования

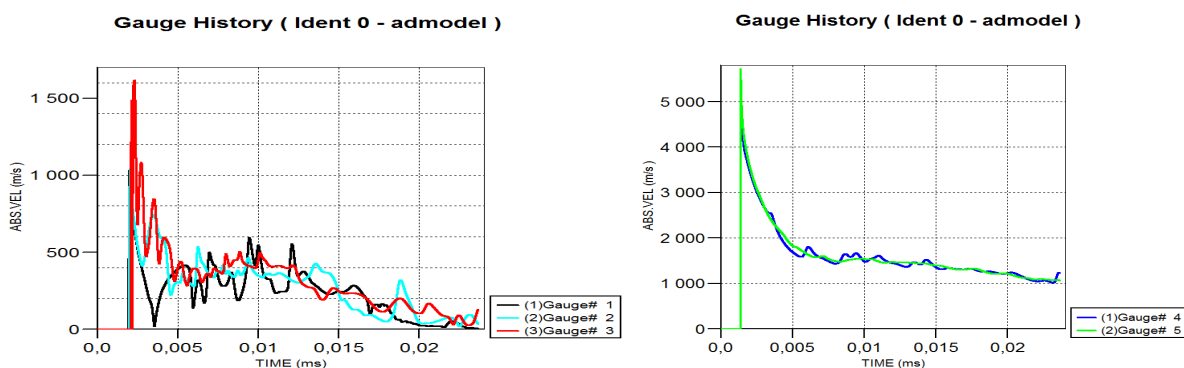


Рис. 3 – Графики зависимостей массовой скорости и скорости продуктов детонации от времени на расстояниях (1) – 10; (2) – 10,17 и (3) – 10,68 мм от точки инициирования

Таблица 1

Основные гидродинамические параметры детонационной волны

№ дат-чика	Данные вычислительного эксперимента	Расчетные данные	Отклонение, %	Среднее значение, %
Плотность, г/см ³				
1	1075	1173	9,1	5,65
2	1090	1173	7,6	
3	1170	1173	0,25	
Массовая скорость, м/с				
1	1030	937	9,0	11,3
2	1040	996	4,2	
3	1615	1281	20,7	
Давление на фронте волны, ГПа				
1	4,56	4,45	2,4	6,03
2	4,70	4,50	4,3	
3	5,89	6,54	11,4	

Средние значения отклонений находятся в пределах 5 – 11 %, что говорит о том, что применяемые параметры адекватно описывают распространение как детонационного фронта, так и продуктов детонации (табл. 1).

В целях обоснования критериев прочности и разрушения проведены серии вычислительных экспериментов в двухмерной постановке, в которых сравнивалась динамика трещинообразования в моделях, представляющих собой образцы горной породы дисковой формы, на момент времени 240 и 300 мкс при применении RHT-модели прочности, моделей Друкера-Прагера, Купера-Саймонда, билинейного упрочнения и модели прочности фон Мизеса (рис. 5, 6). Все модели прочности относятся к классу упругопластических и ориентированы на изотропное деформационное упрочнение.

Геометрия модели представляет собой диск диаметром 132 мм, имеющий внутреннее отверстие диаметром 7,5 мм (рис. 4). В качестве взрывчатого вещества использован ТЭН плотностью 880 кг/м³. В качестве материала горной породы – CONC140MPa с измененными параметрами ($\sigma_{сж}$, σ_p , ρ и др). Общее количество элементов модели – 109 440. Образец горной породы моделируется Лагранжевым решателем, взрывчатое вещество, продукты детонации и окружающая среда – Эйлеровым.

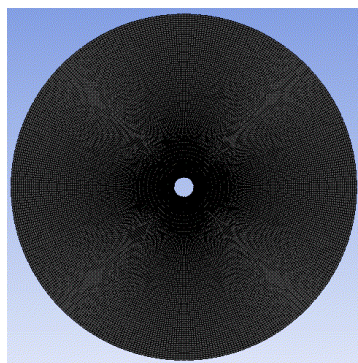


Рис. 4 – Исходная геометрия модели

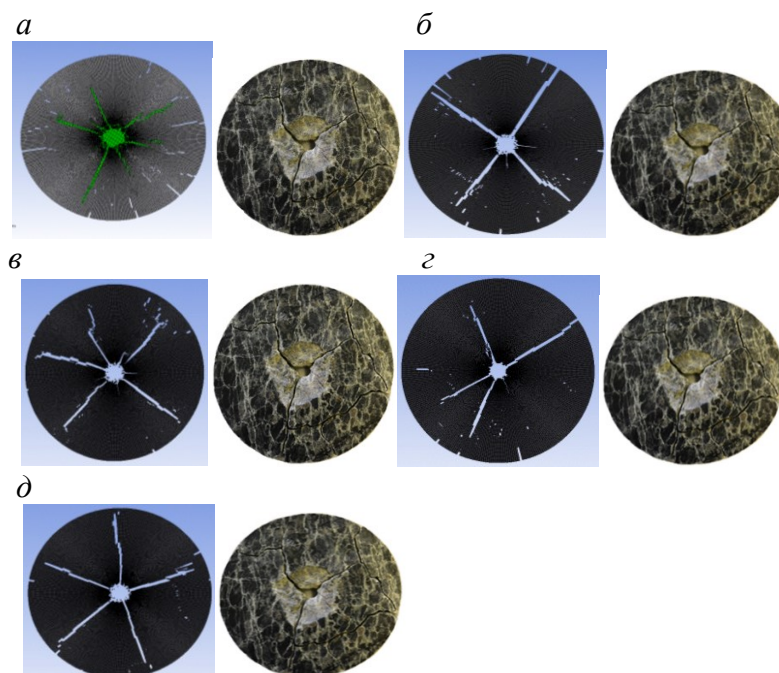


Рис. 5 – Результаты трещинообразования на момент времени 240 мкс с применением различных моделей прочности:

a – RHT-модель; *б* – модель Друкера-Прагера; *в* – модель Купера-Саймонда; *г* – модель билинейного упрочнения; *д* – модель фон Мизеса

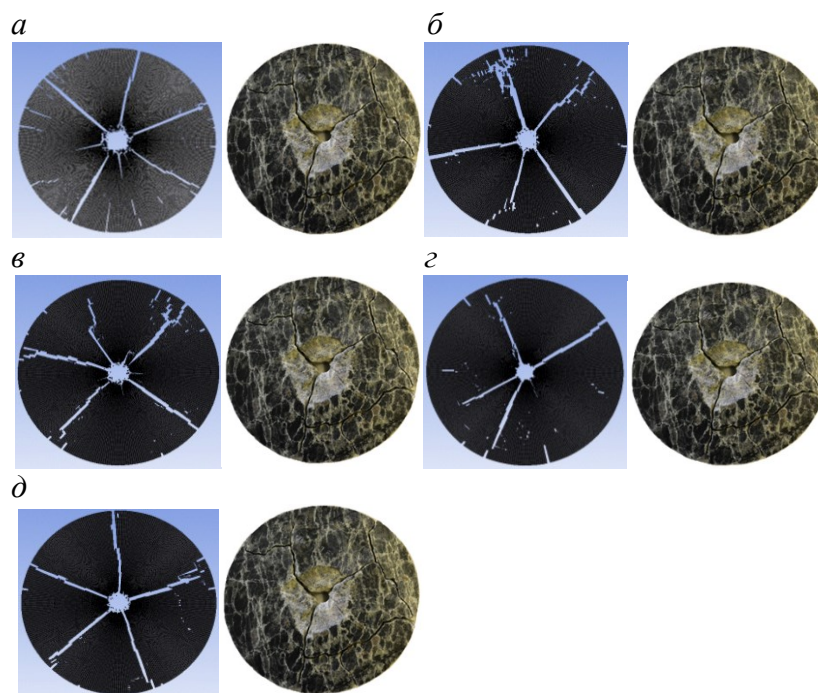


Рис. 6 – Результаты трещинообразования на момент времени 300 мкс с применением различных моделей прочности:
а – RHT-модель; *б* – модель Друкера-Прагера; *в* – модель Купера-Саймонда; *г* – модель билинейного упрочнения; *д* – модель фон Мизеса

По результатам проведенных вычислительных экспериментов можно сделать вывод о том, что все применяемые при моделировании модели прочности имеют достаточно высокую степень адекватности полученным на практике результатам.

Ввиду отсутствия данных по напряженно-деформированному состоянию образцов, а также данных диаграммы динамического деформирования, для адекватного описания процесса разрушения во все модели прочности, кроме RHT, вводился коэффициент динамичности, равный 2. В целях отработки подхода к решению задачи взрыва скважинных зарядов принято решение: дальнейшее исследование проводить с применением RHT-модели прочности, а также моделей прочности билинейного кинематического упрочнения и фон Мизеса.

Постановка задачи взрыва в объеме массива

В модели рассматривается взрыв двух смежных скважинных зарядов взрывчатого вещества (ВВ), расположенных в массиве горных пород. Величина ЛНС – 5 м; длина колонкового заряда ВВ – 10 м; диаметр скважин – 250 мм; расстояние между скважинами – 5 м; масса заряда в скважине – 650 кг, величина недозаряда – 5 м; тип ВВ – ANFO. Моделируемый массив представлен горной породой, имеющей предел прочности на одноосное сжатие 140 МПа. В качестве модели среды была принята RHT-модель прочности, которая наиболее адекватно отражает процесс разрушения апатит-нефелиновых руд.

Геометрия модели представлена в форме прямоугольного параллелепипеда с размерами 15×10×15 м (Д×Ш×В) и размещенными в нем двумя отверстиями диаметром 250 мм и глубиной 15 м (рис. 7).

При моделировании необходимо провести операции по привязке материалов к существующей геометрии, построению конечно-элементной сетки, заданию нагрузок, начальных и граничных условий, внести необходимые корректировки в критерии прочности и разрушения, осуществить конечную настройку решателей.

Массив горных пород моделируется путем привязки Лагранжевого решателя к построенной геометрии, а взрывающееся ВВ, продукты детонации и окружающая среда

– посредством многокомпонентного Эйлера решателя. Встроенный в программу алгоритм связывания различных расчетных сеток позволяет реализовывать расчет жидкостей и газов с твердыми телами, а также их взаимодействие.

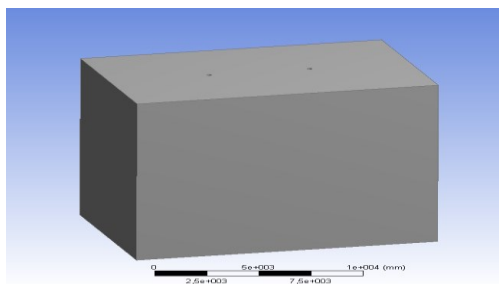


Рис. 7 – Пример построенной геометрии

Расчетная область Лагранжевой части состоит из 300 000 гексаэдрических элементов, Эйлеравой – из $\approx 3\,500\,000$, таким образом, суммарное количество элементов модели составляет $\approx 3\,800\,000$. Высокая дискретизация Эйлеравой расчетной сетки объясняется внутренней организацией расчетного алгоритма, а также рекомендациями разработчика программного обеспечения, следуя которым для адекватного расчета гидродинамических параметров необходимо, чтобы линейные размеры элемента Эйлеравой части были как минимум в два раза меньше линейных размеров элемента Лагранжевой части.

При выборе граничных условий принято условие непротекания продуктов детонации через границы расчетной области обратно в модель и условие отражения нормальной составляющей волн напряжений по 2-м граням.

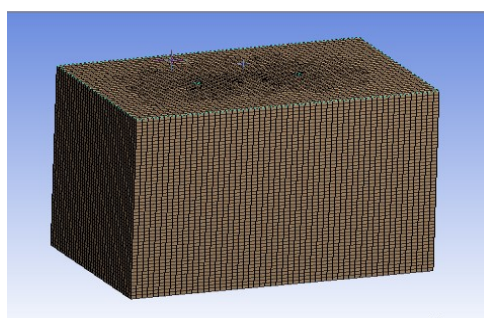


Рис. 8 – Конечно-элементная модель блока

При моделировании взрыва скважинных зарядов в массиве горных пород были получены распределения полей давлений и формирование зоны нарушенности в массиве на любой момент времени. В качестве примера приведено распределение поля давлений в массиве на момент времени 5 мс (рис. 9) и формирование зоны нарушенности массива на момент 2 мс (рис. 10).

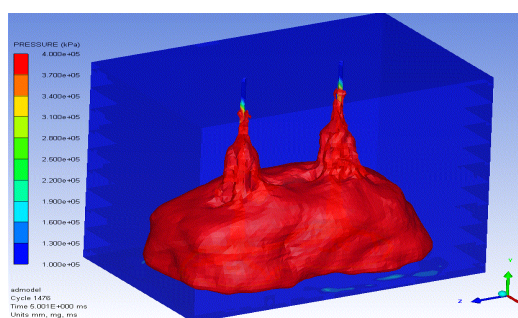


Рис. 9 – Распределение поля давлений в массиве на момент времени 5 мс

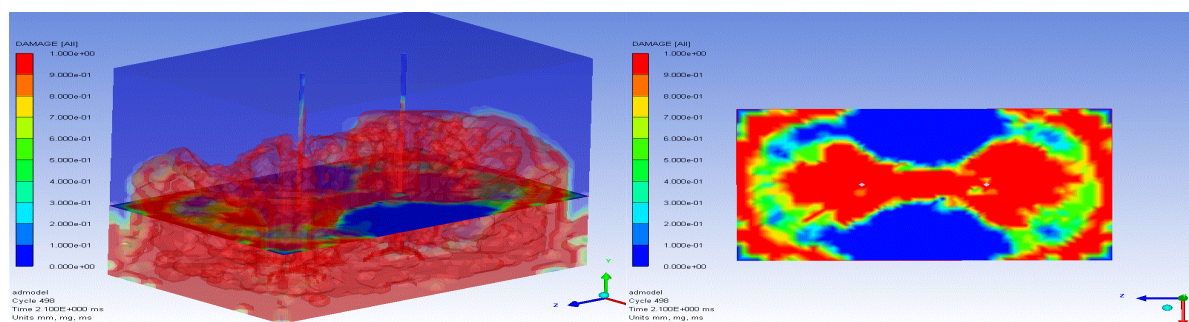


Рис. 10 – Формирование зоны возможной нарушенности массива на момент времени 2 мс

Выводы

В ходе проведения вычислительных экспериментов отработан подход к решению задач взрыва скважинных зарядов в массиве горных пород в трехмерной постановке. Проведена проверка степени соответствия гидродинамических параметров детонационной волны и продуктов детонации расчетным данным. Установлено, что при моделировании взрыва апатит-нефелиновых руд наиболее целесообразно применять RHT-модель прочности, а также модели прочности билинейного кинематического упрочнения и фон Мизеса.

В работе показана возможность определения зоны наиболее вероятной нарушенности массива при взрыве, а также распределение полей интересующих величин.

Полученные результаты позволяют рассмотреть процесс разрушения горной породы в процессе взаимодействия зарядов, что дает возможность определить оптимальные расстояния между ними по условиям энергонасыщенности массива и необходимой степени дробления.

Литература

1. CADprofi [Электронный ресурс] — Режим доступа: URL: http://www.cadprofi.ru/wiki/index.php/ANSYS_AUTODYN
2. ANSYSAutodyn-2Dand 3D, Version 11, UserDocumentation, AnsysInc. - 2007.
3. Биргер И.А. Сопротивление материалов: учеб. пособие / И.А. Биргер.— М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986.— 560 с.
4. Fišerova D. Numerical analyses of buried mine Explosions with emphasis on effect of Soil properties on loading. Defence college of management and Technology. Phd thesis. - P. 239.